

МЕТОД ПОЛУЗАМКНУТОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Вейнгер А. М.

Rockwell Automation, Москва

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В современных регулируемых электроприводах переменного тока большой мощности обычно используются преобразователи частоты (ПЧ), в которых частота замыкания системы сравнительно невысока; в ПЧ на основе зависимого инвертора тока эта частота изменяется вообще от нулевого значения. В некоторых ПЧ предусмотрен выходной фильтр, и цепи статора обладают резонансными свойствами.

Указанные особенности затрудняют использование известных методов управления. Было предложено дополнить методы нелинейных многомерных систем подчинённого регулирования [1] методом полузамкнутого управления [2]. Метод был продемонстрирован в [2] на примерах синхронного электропривода.

Задача данного доклада – продемонстрировать метод полузамкнутого управления на примере асинхронного электропривода.

2. ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

Рассматривается асинхронный электропривод на основе инвертора тока с ШИМ. Схема главных цепей представлена на рис. 1.

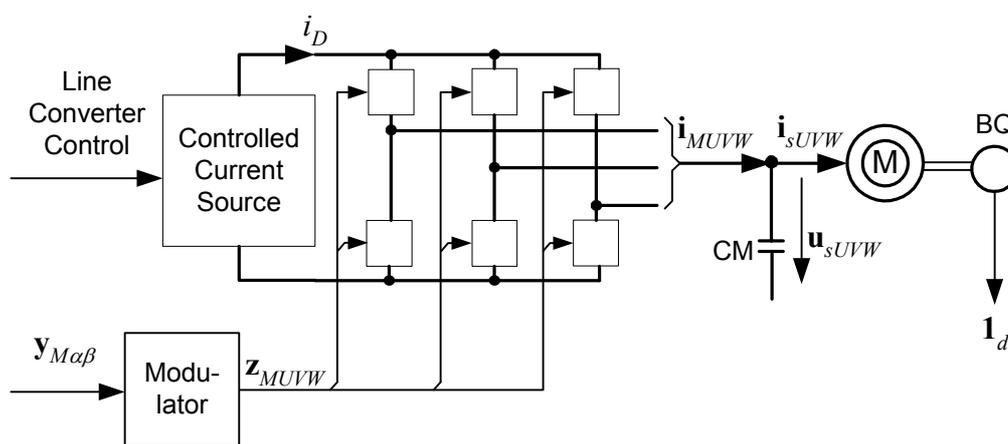


Рис. 1

Сторона сети ПЧ представлена как регулируемый источник тока и здесь не рассматривается.

Вектор $\mathbf{z}_{MUVW} = (z_{MU}, z_{MV}, z_{MW})$ определяет состояние плеч инвертора. Например, значение $z_{MU} = 1$ соответствует соотношению $i_{MU} = i_D$, значение $z_{MU} = -1$ соответствует соотношению $i_{MU} = -i_D$, значение $z_{MU} = 0$ соответствует соотношению $i_{MU} = 0$. Вектор

\mathbf{z}_{MUVW} формируется модулятором, который управляется вектором $\mathbf{y}_{M\alpha\beta}$ в координатах статора. Датчик положения BQ формирует направляющий вектор оси d ротора $\mathbf{1}_d = (\cos \gamma, \sin \gamma)$.

Структурная схема объекта регулирования показана на рис. 2. В состав объекта входят звено механического движения *Mech-Move* и звено электромагнитных контуров асинхронного двигателя. Специфика объекта – дополнительное звено, соответствующее конденсаторной батарее фильтра *CM*. Векторы представлены в осях d, q ротора. Переменные и параметры, за исключением времени и постоянных времени, рассматриваются как относительные величины. Обозначения для токов и напряжения показаны на схеме. Специальные обозначения: Ω_b – базовая угловая частота, \mathbf{J} – матрица поворота вектора на угол $\pi/2$.

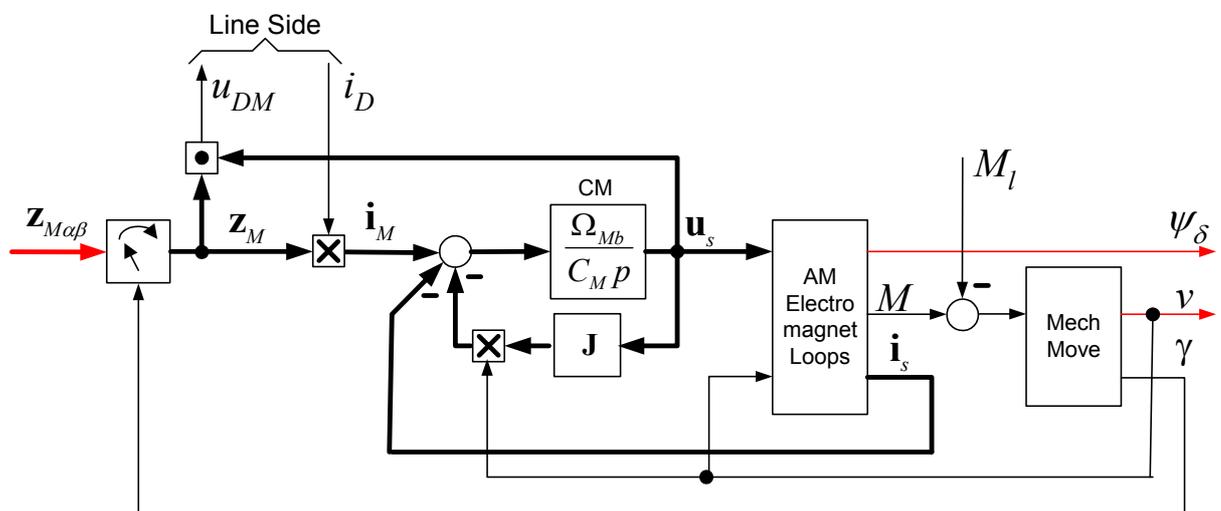


Рис. 2

Входом является вектор $\mathbf{z}_{M\alpha\beta}$. Выходы – скорость v и модуль вектора основного потока ψ_δ .

3. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Общая структура приведена на рис. 3 (без внешнего контура регулирования скорости). Она соответствует теории нелинейных многосвязных систем подчинённого регулирования. Отличительная особенность – дополнительный внутренний контур регулирования напряжений статора, соответствующий дополнительному звену объекта.

Метод полузамкнутого управления поясняется на примере регулятора напряжений статора. Структурная схема регулятора показана на рис. 4.

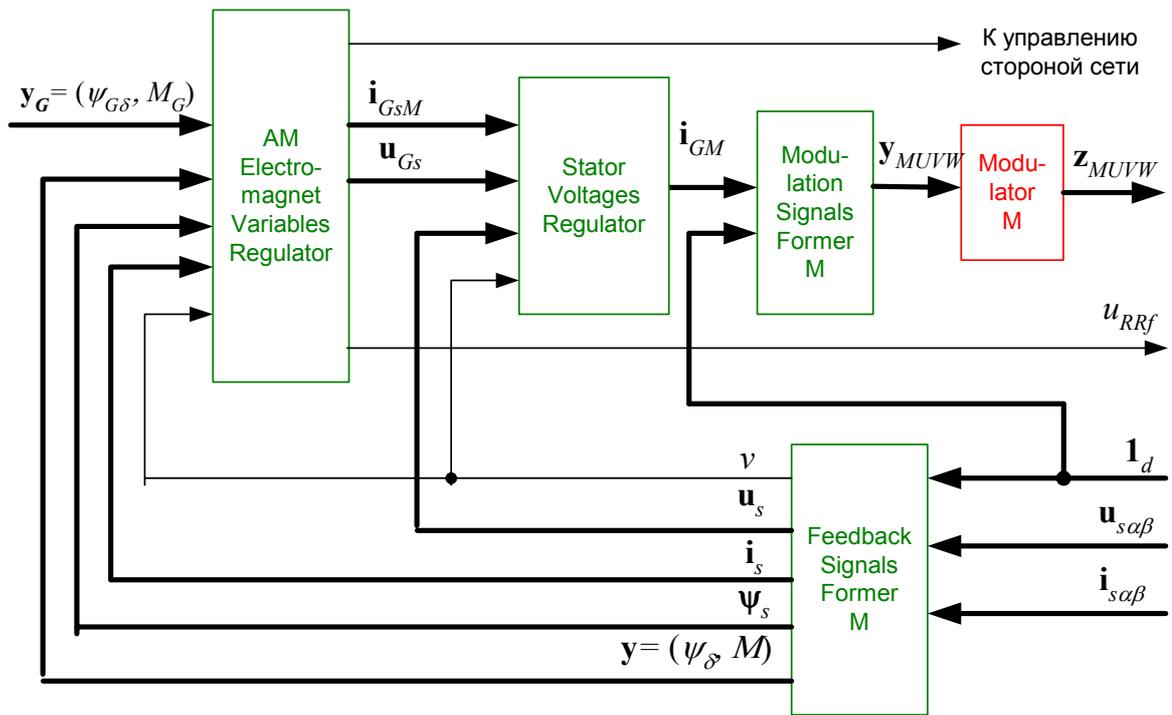


Рис. 3

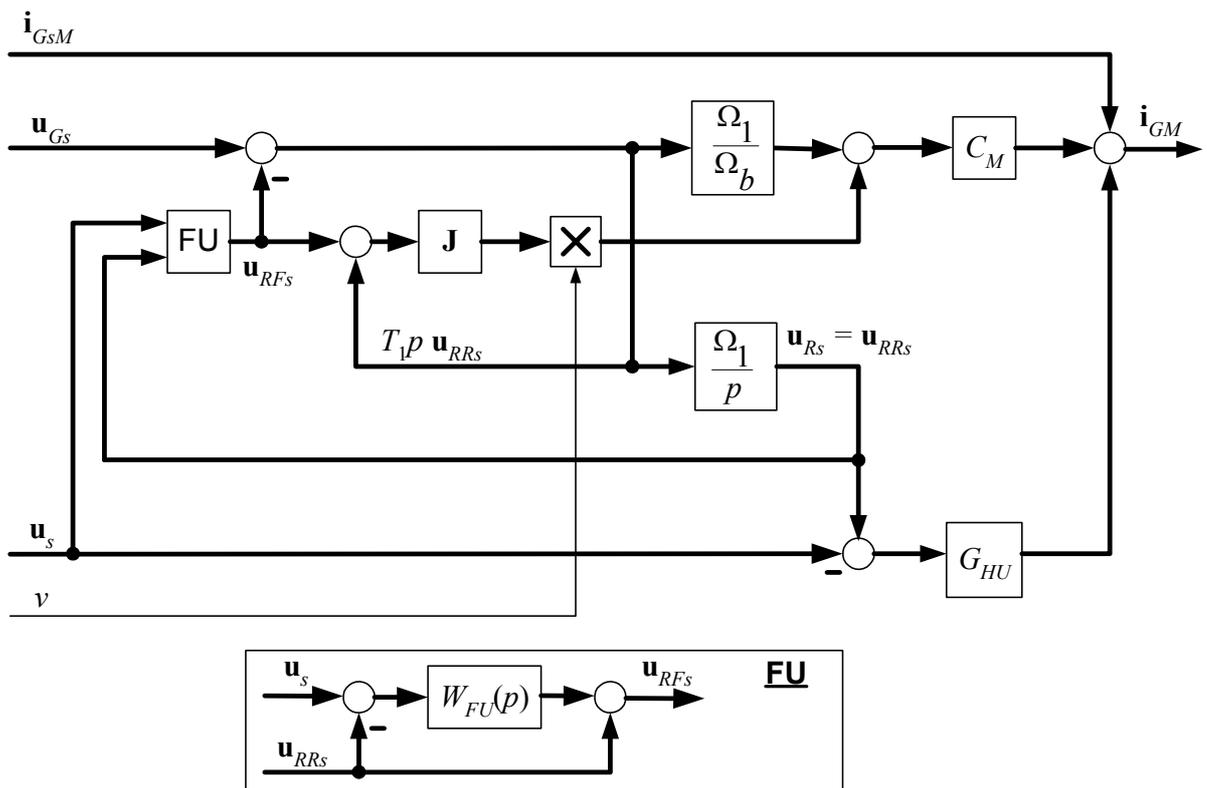


Рис. 4

В целом регулятор построен в соответствии с методами нелинейных многосвязных систем подчинённого регулирования [1]. Задающим регулятора является вектор \mathbf{u}_{Gs} , сигналом обратной связи – вектор \mathbf{u}_{RFs} . Задание поступает от регулятора электромагнитных переменных АД. Оттуда же вводится компенсирующий сигнал \mathbf{i}_{GsM} . Выходом регулятора является задание выходного тока инвертора \mathbf{i}_{GM} . Внутри

регулятора формируется вектор \mathbf{u}_{RRs} . Он может рассматриваться как ожидаемый процесс для вектора напряжений статора \mathbf{u}_s .

Жёсткая отрицательная обратная связь с коэффициентом G_{HU} также соответствует теории нелинейных многосвязных систем подчинённого регулирования.

Метод полужамкнутого управления реализуется элементом FU , формирующим вектор обратной связи. Этот вектор формируется из измеренной обратной связи \mathbf{u}_s и ожидаемого вектора \mathbf{u}_{RRs} .

Измеренный вектор проходит через фильтр с передаточным оператором $W_{FU}(p)$. В простейшем случае соотношение имеет вид:

$$\mathbf{u}_{RFs} = \frac{T_{FUP}}{1 + T_{FUP}} \mathbf{u}_{RRs} + \frac{1}{1 + T_{FUP}} \mathbf{u}_s. \quad (1)$$

Здесь T_{FU} – постоянная времени фильтра. В быстрых процессах действует связь по ожидаемому вектору, что соответствует разомкнутому управлению. В медленных процессах действует обратная связь по измеренному вектору, что соответствует замкнутому управлению.

Предположим, что вектор выходного тока инвертора выражается через задание и возмущение следующим образом:

$$\mathbf{i}_M(t) = \mathbf{i}_{GM}(t) + \mathbf{i}_{Mn}(t). \quad (2)$$

Возмущение вносится, прежде всего, дискретностью инвертора. В отсутствие возмущения напряжение статора выражается через задание посредством желаемого типового оператора:

$$\mathbf{u}_s = \frac{1}{1 + T_1 p} \mathbf{u}_{Gs}; T_1 = \frac{1}{\Omega_1}. \quad (3)$$

Здесь Ω_1 – полоса пропускания контура регулирования. Влияние возмущения на задание тока выражается соотношением:

$$\mathbf{i}_{GMn} = -\frac{1}{1 + T_1 p} \frac{1}{1 + T_{FUP}} \mathbf{i}_{Mn}. \quad (4)$$

Таким путём обеспечивается должная фильтрация возмущения.

Подобным образом реализуется метод полужамкнутого управления также в регуляторе электромагнитных переменных АД.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование выполнено с параметрами АД: 7 MW, 300/450 min⁻¹, 30/45 Hz. ПЧ в модели – на основе ИТ с ШИМ, преобразователь со стороны сети – 18-пульсный тиристорный выпрямитель-инвертор. Резонансная частота цепи статора составляет $f_{res} \approx 150$ Hz. Частота модуляции инвертора – $f_{mod} = 450$ Hz. Полоса пропускания контура

регулирования напряжений статора – $\Omega_1 = 400 \text{ rad/s}$. Контур регулирования скорости принят с полосой пропускания $\Omega_v = 25 \text{ rad/s}$. Моделируется специальный регулятор скорости со свойствами П регулятора по отношению к заданию и ПИ регулятора по отношению к нагрузке.

Моделировалась дискретная модель. Время цикла для модели объекта выбрано $T_{s0} = 20 \text{ }\mu\text{s}$, времена цикла для блоков алгоритма управления: для блока *Modulator* – то же самое время T_{s0} , для блоков *Modulation Signals Former*, *Voltage Regulator*, *Feedback Signals Former*, *AM Electromagnet Variables Regulator* – $T_{s1} = 200 \text{ }\mu\text{s}$, для регулятора скорости – $T_{s2} = 1 \text{ ms}$. Эти времена циклов обеспечивают нормальное функционирование алгоритма.

Процессы при типовых воздействиях регулируемого электропривода представлены на рис. 5: разгон без нагрузки, наброс – сброс нагрузки, замедление до остановки. Команда скорости принята $v_{cmd} = 1.5$ для демонстрации функционирования в верхней зоне скорости с ослаблением поля. Дополнительное обозначение: v_G – задание скорости.

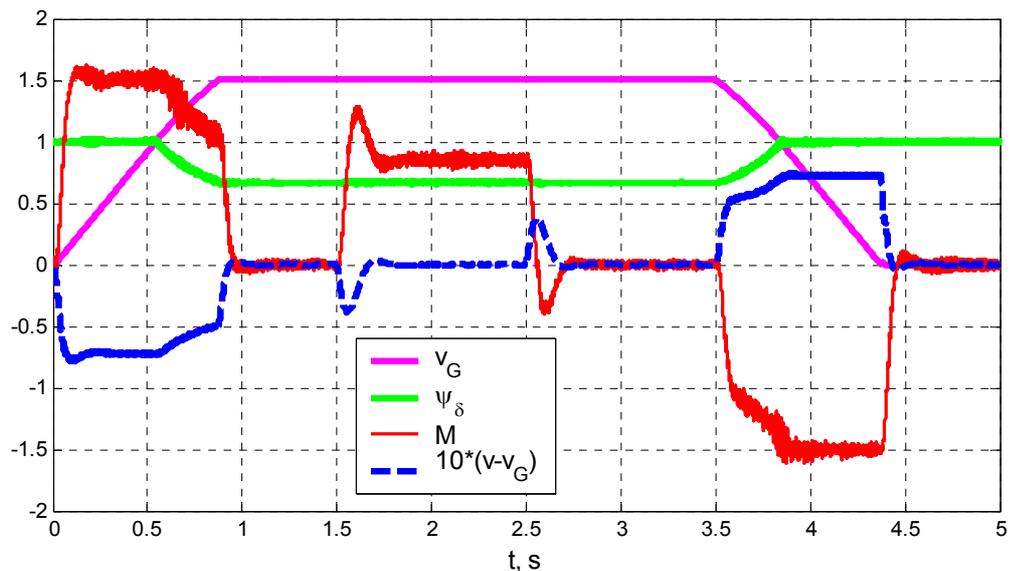


Рис. 5

Зарегистрированные процессы практически совпадают с желаемыми типовыми процессами регулируемого электропривода.

Резонансные колебания в цепи статора не проявляются.

На рис. 6, а в растянутом времени показаны сигналы обратной связи регулятора напряжений на одном из интервалов того же процесса.

Сигналы представлены в системе координат 1, 2, ориентированной по вектору потока ротора. Амплитуда пульсаций в сигналах обратной связи u_{RFs1} , u_{RFs2} более чем на порядок меньше по сравнению с измеренными сигналами u_{s1} , u_{s2} . Соответственно

уменьшены пульсации в управляющих сигналах модулятора. Эти сигналы показаны для интервала процесса на рис. 6, б.

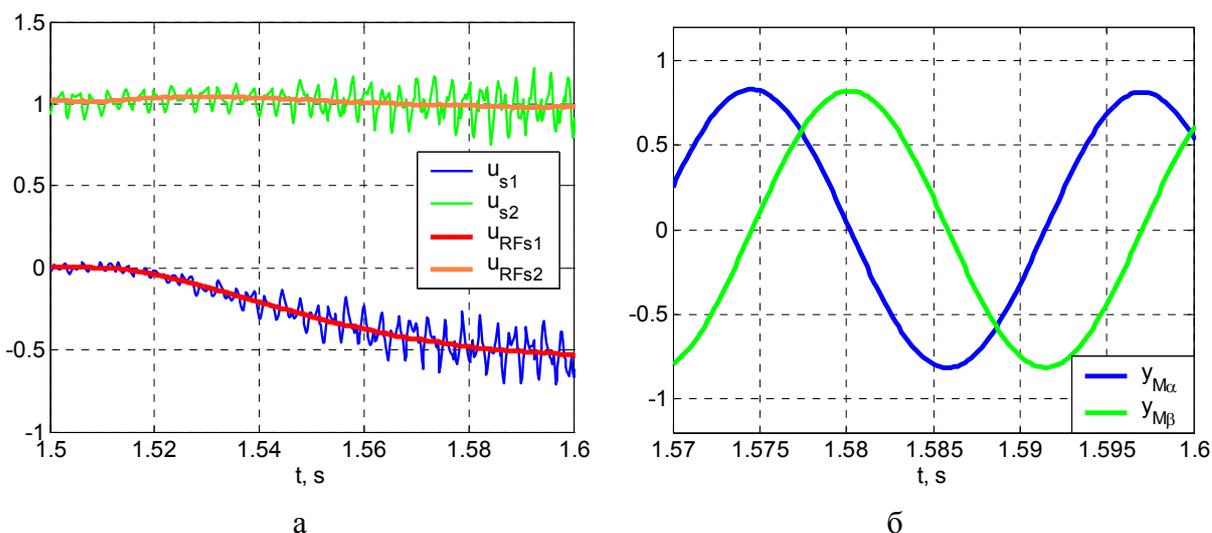


Рис. 6

Гладкая форма управляющих сигналов модулятора позволяет обеспечить должное качество регулирования без дополнительного запаса по выпрямленному току ПЧ и по напряжению выпрямителя.

5. ВЫВОДЫ

1. Полузамкнутое управление, в сочетании с методами нелинейных многосвязных систем подчинённого регулирования, обеспечивает необходимое качество процессов асинхронного электропривода, даже при низкой частоте модуляции ПЧ и при резонансных свойствах цепи статора.

2. Подавление пульсаций в управляющих сигналах модулятора позволяет снизить запасы по току и напряжению ПЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вейнгер А. М. Регулируемый синхронный электропривод. М.: Энергоатомиздат, 1985, 224 с.

2. Weinger A. Potential of AC drives with semi-closed control // Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference.- June 1-4, 2003.- Madison, Wisconsin, USA.- pp. 1511-1517.

МЕТОД ПОЛУЗАМКНУТОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Вейнгер А. М.

Аннотация. Предложен метод управления синхронными и асинхронными электроприводами, сочетающий преимущества разомкнутого и замкнутого управления. Область применения охватывает, в основном, высоковольтные регулируемые электроприводы большой мощности. В этой области известные методы не дают желаемых результатов из-за специфики преобразователей частоты большой мощности: низкой частоты замыкания системы (в некоторых случаях – начинающейся с нулевой частоты) и резонансных свойств цепей статора.

Предлагаемый метод полужамкнутого управления сочетается с методами нелинейных многосвязных систем подчинённого регулирования. Обеспечиваются высокое быстродействие и высокая точность регулирования, типовые динамические свойства электропривода. В качестве примера рассмотрен асинхронный электропривод на основе инвертора тока с ШИМ.

METHOD OF SEMICLOSED CONTROL OF AC DRIVES

A. Weinger

Abstract. Control method is proposed for synchronous and asynchronous AC drives combining advantages of open-loop and closed-loop control. Application field covers mainly high-power MV controlled drives. In this field known methods don't provide desired results because of specifics of high-power frequency converters. These are: low and sometimes unlimitedly low frequency of system closing, resonant stator circuits.

Proposed method of semi-closed control is composed with methods of non-linear multi-connected subordinate control. This provides high quick-responsibility and high accuracy of control, type dynamics. As an example the asynchronous drive is considered on the base of PWM CSI.

Сведения об авторе

Вейнгер Александр Меерович.

Домашний адрес: 119002, Москва, Староконюшенный пер., 5/14, кв. 3, тел.: 095 202 9303.

Е-mail: weinger@rockwell.ru

Место работы: Московское представительство компании Rockwell Automation, 115054, Москва, Б. Строченовский пер. 22/25, оф. 402, тел.: 095 956 0464.

Профессор, доктор техн. наук.

Окончил энергетический факультет Уральского Политехнического института в 1955 г. и математико-механический факультет Уральского Государственного Университета в 1964 г.

Докторская диссертация – "Регулируемый синхронный электропривод", 1988 г.

